

# Geometrisch bestimmte Oberflächenstrukturen zur formschlüssigen Substratanbindung thermisch gespritzter Schichten

*M. Rodriguez Diaz, M. Nicolaus, K. Möhwald*

*Institut für Werkstoffkunde (Materials Science) / Leibniz Universität Hannover*

*rodriguez@iw.uni-hannover.de*

*F. Vogel, D. Biermann,*

*Institut für Spanende Fertigung / Technische Universität Dortmund*

*vogel@isf.de*

---

## Abstract

Die Haftfestigkeit einer thermisch gespritzten Schicht auf dem Grundwerkstoff stellt ein wesentliches Qualitätsmerkmal dar und entscheidet unter anderem, ob der Verbund in der Praxis eingesetzt werden kann. In der industriellen Anwendung haben sich Strahlprozesse für das Aufräumen und Aktivieren der Substratoberfläche etabliert. Aufgrund der verfahrenstypischen Nachteile und Einschränkungen, die die Strahlprozesse mit sich bringen, kommen zunehmend auch spanende Verfahren zur Oberflächenaktivierung zum Einsatz. Ein bereits bekanntes Beispiel hierfür ist das Einbringen eines Schwalbenschwanzprofils mit Schneidplatten in Aluminium-Zylinderlaufbahnen. Dieses Forschungsvorhaben fokussiert sich auf die Entwicklung innovativer Strukturierungen von Substratoberflächen als Alternative zum konventionellen Strahlspanen. In diesem Beitrag wird gezeigt, dass die Verfahrenskombination Rändelfräsen und Umwalzen eine effiziente Methode für die Erzeugung von Oberflächenstrukturen zur formschlüssigen Substratanbindung thermisch gespritzter Schichten darstellt.

---

## 1 Einleitung

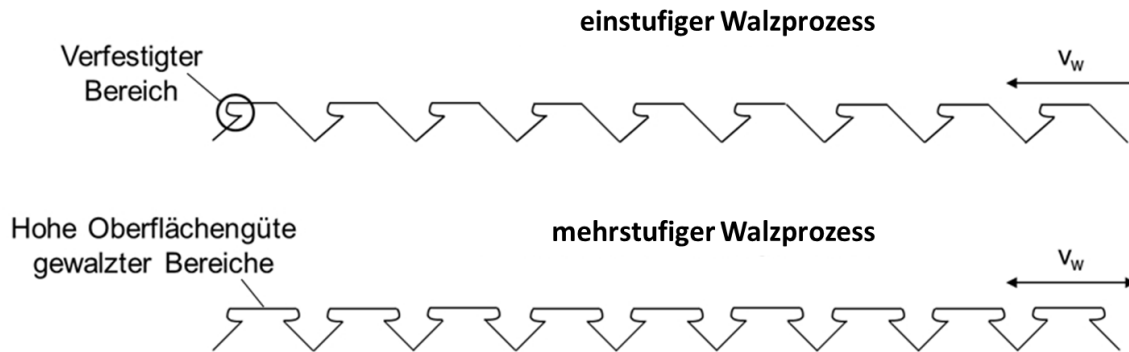
Eines der wesentlichen Kriterien für den Einsatz von thermisch gespritzten Schichten in der industriellen Praxis, ist die Schichtanbindung an das Substrat. Sie beruht dabei auf dem Zusammenwirken von physikalisch-chemischen Mechanismen, wie van-derWaals Wechselwirkungen, Chemisorption und Physisorption sowie der mechanischen Verklammerung. Bei der mechanischen Verklammerung wird der Haftungsmechanismus durch die Oberflächenrauheit der Substratoberfläche maßgeblich bestimmt [1]. Eine ent-

scheidende Einflussnahme auf die Schichthaftungsmechanismen ist u. a. durch eine angepasste Vorbereitung der Substratoberfläche für das thermische Spritzen gegeben. Nach der DIN EN 13507:2010-06 zählen hierzu primär die Reinigung sowie die Oberflächenaktivierung, die die Entfernung störender Oxidschichten und das Aufräumen des Substrats bei gleichzeitiger Erhöhung der Versetzungsdichte beinhaltet. Für das Aufräumen und Aktivieren der Substratoberfläche haben sich Strahlprozesse etabliert, wobei überwiegend geschmolzener Edelmetall, Siliciumcarbid und Hartgussstrahlmittel Anwendung finden [2]. Zwar gilt das Strahlen als effizientes Verfahren mit guter Einstell- und Regelbarkeit [3, 4], jedoch sind die vergleichsweise langen Prozesszeiten und die erforderliche Bauteilreinigung nach Prozessende nachteilig [2]. Für reproduzierbare Prozessergebnisse ist zudem eine Überwachung des Strahlguts hinsichtlich einer Abstumpfung über die Einsatzdauer notwendig [5]. Neben den erforderlichen Investitionskosten in eine entsprechende Anlagentechnik ist der Betrieb der Strahlanlagen aufgrund der benötigten Druckerzeugung mit einem hohen Energiebedarf verbunden [5, 6]. Des Weiteren bestehen strenge Auflagen zum Gesundheits- und Umweltschutz im Umgang mit dem Strahlgut [6]. Insbesondere für die Automobilindustrie ist das spanende Aufräumen von Oberflächen u. a. aufgrund des Wegfalls notwendiger Reinigungsschritte und der Einsparung von Maschinen von großem technischem und wirtschaftlichem Interesse. So wird in Aluminium-Zylinderlaufbahnen unter Verwendung spezieller Schneidplatten ein Schwalbenschwanzprofil eingebracht, welches die formschlüssige Anbindung einer thermisch gespritzten Verschleißschicht (Eisenbasislegierung) an das Substrat ermöglicht. Bei einer Schnitttiefe von  $a_p = 100 \mu\text{m}$  werden dabei Haftzugfestigkeiten von  $R_H = 60 \text{ MPa}$  erzielt [7].

Im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projekts „Geometrisch bestimmte Oberflächenstrukturierung zur formschlüssigen Anbindung thermisch gespritzter Schichten“ (GZ: BI 498 90) entwickelt das Institut für Werkstoffkunde der Leibniz Universität Hannover in Kooperation mit dem Institut für Spanende Fertigung der TU Dortmund eine alternative Verfahrenskombination zur formschlüssigen Substratanbindung thermisch gespritzter Schichten. Hierbei wird zunächst durch einen Rändelfräsprozess eine Zahntopologie in die Substratoberfläche (Wellenmaterial) eingebracht, wobei die Rändelradteilung die Zahntiefe und den Abstand der Zahnköpfe bestimmt. Durch einen nachgelagerten Umwalzprozess wird das Rändelprofil derart umgeformt, dass sich Hinterschneidungen ausbilden, die eine formschlüssige Anbindung der thermischen Spritzschicht an das Substrat ermöglichen. Dieser Beitrag zeigt die ermittelten Haftzugfestigkeiten von NiCr 80/20 Beschichtungen an unterschiedlichen Oberflächengeometrien und vergleicht die Ergebnisse mit konventionell hergestellten Beschichtungen.

## 2 Experimentelles

Im Rahmen dieses Projektes wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt. Die in den Versuchsreihen hergestellten Oberflächenstrukturen sind in *Abb. 1* schematisch dargestellt und werden im Folgenden entsprechend gegliedert beschrieben.



*Abb. 1: Oberflächenstrukturen der jeweiligen Versuchsreihen*

### 2.1 Erste Versuchsreihe

Im Rahmen der ersten Versuchsreihe wurden die Mantelflächen von Stahlwellen (Werkstoffnummer 1.7225, Durchmesser  $D = 40$  mm, Länge  $L = 200$  mm) mittels des Rändelfräsverfahrens, der Verfahrenskombination Rändelfräsen und Umwalzen sowie konventionelles Korundstrahlen (Edelkorund EKF 54), welches als Referenz dient, unterschiedlich vorbearbeitet und aktiviert. Bei ausgewählten Proben erfolgte zusätzlich die Umformung der Zahnköpfe des generierten Profils durch einen weiteren Walzprozess. Ziel des Umwalzens war, die Profilspitzen kalt zu verformen und so Hinterschneidungen in Walzrichtung auszubilden, wodurch eine mechanische Verklammerung der Schichten ermöglicht wird. Die verwendeten Rändelfräs- und Umwalzparameter zum Aufbringen des periodischen Profils in die Mantelflächen der Wellen, sind in *Tab.1* aufgeführt.

Tab. 1: Verfahrensparameter

Rändelfräseparameter				
Teilung	Zustellung	Schnittgeschw.	Vorschub	KSS
$t_R = 0,3 \text{ mm}$	$a_R = 0,25 \text{ mm}$	$v_c = 35 \text{ m/min}$	$f = 0,075 \text{ mm/U}$	Emulsion 6 %
Umwalzparameter (Walzen der Rändelung)				
Kugel-Ø	Zustellung	Walzgeschw.	Vorschub	KSS
$D = 4 \text{ mm}$	$a_w = 1,5 \text{ mm}$	$v_w = 100 \text{ m/min}$	$f = 0,05 \text{ mm/U}$	Emulsion 6 %

Die anschließende Beschichtung erfolgte mittels des Hochgeschwindigkeitsflammspritzverfahrens (HVOF) und der Verwendung von NiCr 80/20 Pulver (Metco 43F-NS,  $-63 + 10 \text{ }\mu\text{m}$ , wasserverdüst) als Beschichtungswerkstoff. Die verwendeten Beschichtungsparameter sind in Tab. 2 aufgeführt.

Tab. 2: Beschichtungsparameter

Brenner	Kerosin	Sauerstoff	Abstand	Düse	Relativgeschw.
K2, GTV	24 l/h	800 l/min	300 mm	L: 100 mm, Ø: 11 mm	1,8 m/s

Die Abb. 2 zeigt Schliffbilder ausgewählter NiCr 80/20 Beschichtungen an mittels Rändelfräsen (a)), der Verfahrenskombination Rändelfräsen und Walzen (b)) sowie Korundstrahlen (c)) vorbereiteten Substraten.

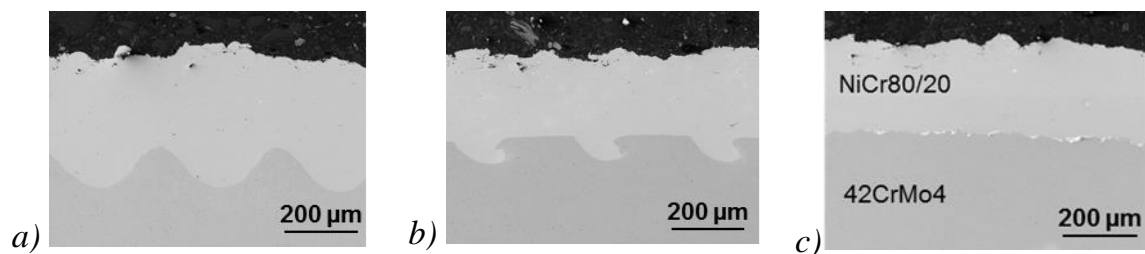


Abb. 2: Querschliffe der beschichteten Proben: a) gerändelte, b) gerändelte und einstufig umgewalzte, sowie c) korundgestrahlte Substratoberfläche

## 2.2 Zweite Versuchsreihe

In der zweiten Versuchsreihe wurden Wellen aus Automatenstahl (Werkstoffnummer 1.0715, Durchmesser  $D = 40$  mm, Länge  $L = 200$  mm) eingesetzt, wobei analog zur ersten Versuchsreihe eine Variation der Substratvorbehandlung vor dem Beschichtungsprozess erfolgte. Anders als in der ersten Versuchsreihe wurde die durch das Rändelfräsen erzeugte Zahntopologie nun durch einen vierstufigen Walzprozess, bei dem die Drehrichtung der Welle je Zustellinkrement geändert wurde, sukzessive umgewalzt. Dabei blieb die Größe der Inkremente konstant. Zusätzlich wurde bei ausgewählten Proben die nach Tab. 2 aufgebrachte NiCr 80/20 Beschichtung mittels eines Festwalzprozesses nachbearbeitet. Die dafür verwendeten Parameter sowie die Parameter für das Walzen der Rändeltopologie sind in der folgenden Tab. 3 zusammengefasst.

Tab. 3: Verfahrensparameter

Rändelfräseparameter				
Teilung	Zustellung	Schnittgeschw.	Vorschub	KSS
$t_R = 0,3$ mm	$a_R = 0,25$ mm	$v_c = 35$ m/min	$f = 0,075$ mm/U	Emulsion 6 %
Umwalzparameter (Walzen der Rändelung)				
Kugel-Ø	Zustellung	Walzgeschw.	Vorschub	KSS
$D = 4$ mm	$a_w = 0,8$ mm	$v_w = 35$ m/min	$f = 0,05$ mm/U	Emulsion 6 %
Festwalzparameter (Walzen der Beschichtung)				
Kugel-Ø	Zustellung	Walzgeschw.	Vorschub	KSS
$D = 4$ mm	$a_w = 1,5$ mm	$v_w = 35$ m/min	$f = 0,05$ mm/U	Emulsion 6 %

Die Abb. 3 zeigt den Querschliff einer mehrstufig gewalzten, sowie den einer im Nachbearbeitungsschritt festgewalzten NiCr 80/20 Beschichtung.

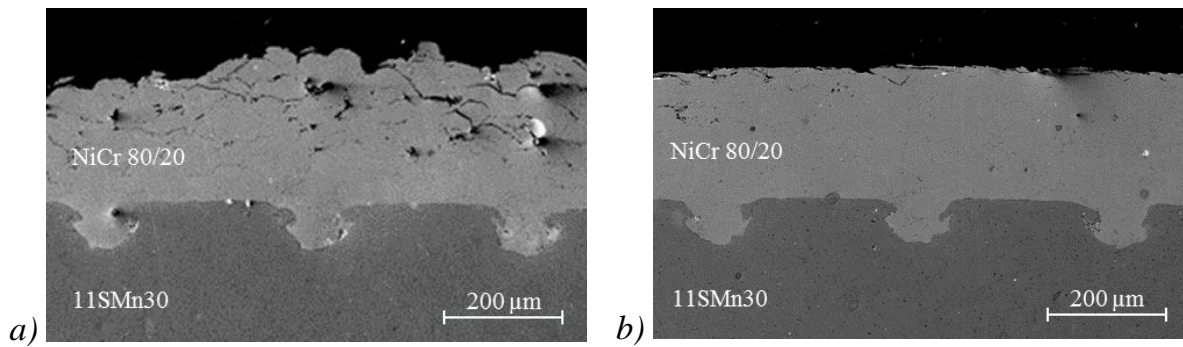


Abb. 3: Querschliff einer a) unbehandelten und b) festgewalzten Beschichtung an gerändeltem und mehrstufig gewalztem Substrat

Die durchgeführten Haftzugfestigkeitsprüfungen an beiden Versuchsreihen erfolgte in Anlehnung an die DIN EN 582. Hierzu wurden aus den beschichteten Wellen Segmente herausgetrennt, an denen auf der Unterseite ein weiterer Zylinder mit einem Durchmesser von  $D = 40$  mm und einer Höhe von  $h = 100$  mm mittels Ultrabond 100 festgeklebt wurde. An der Unterseite der Zylinder befand sich ein M8-Gewinde zur Aufnahme in eine Zugprüfmaschine. Für die gewölbte Seite des beschichteten Zylindersegments wurde ein entsprechendes Gegenstück gefertigt, das ebenfalls mit einem weiteren Zylinder fixiert wurde. Die zu untersuchende Beschichtung wurde anschließend versiegelt und mit dem angefertigten Gegenstück verklebt (Ultrabond 100). Somit wurde die Einspannung des angefertigten Probensegments in die Zugprüfmaschine ermöglicht. In Abb. 4 ist die Herstellung der Haftzugfestigkeitsproben schematisch dargestellt.

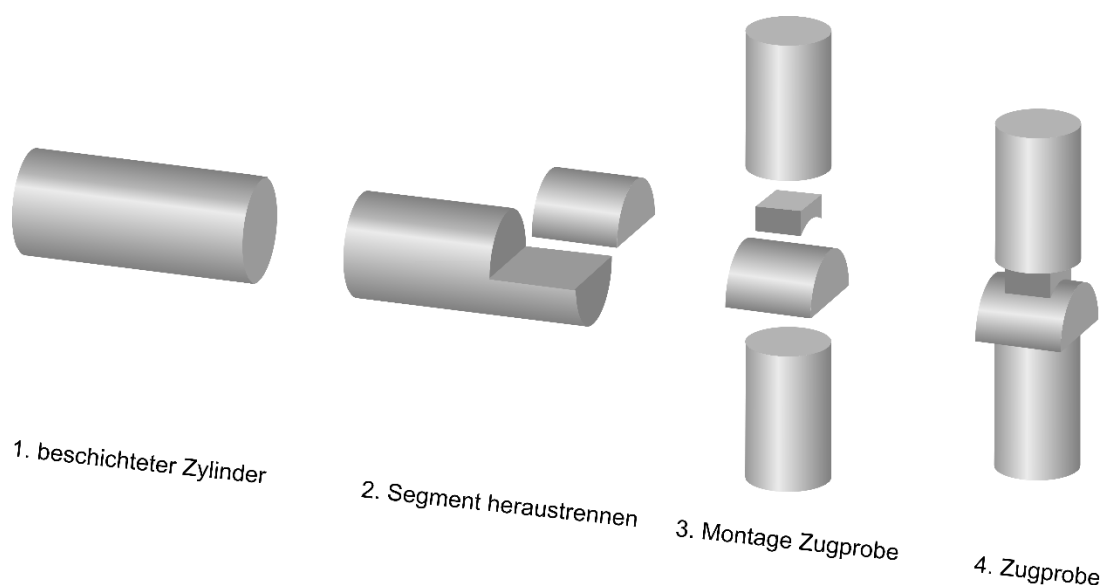


Abb. 4: Herstellung der Haftzugfestigkeitsproben

An dieser Stelle sei angemerkt, dass aufgrund der verwendeten Probengeometrie zusätzliche Scherkräfte auftreten, sodass die ermittelten Zugfestigkeiten hier geringer ausfallen als für HVOF gespritzte NiCr 80/20 Schichten normalerweise üblich.

### 3. Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Haftzugfestigkeitsprüfungen beider Versuchsreihen dargestellt.

#### 3.1 Ergebnisse der ersten Versuchsreihe

In Abb. 5 sind die Schliffbilder der beschichteten Substrate mit den unterschiedlich vorbehandelten Substratoberflächen aufgeführt: a) gerändelt, b) gerändelt und gewalzt sowie c) gestrahlt, wobei die gestrahlten Proben vor dem Beschichtungsprozess einen Mittenrauwert von  $R_a = 3,39 \mu\text{m}$  und eine gemittelte Rautiefe von  $R_z = 14,40 \mu\text{m}$  aufwiesen.

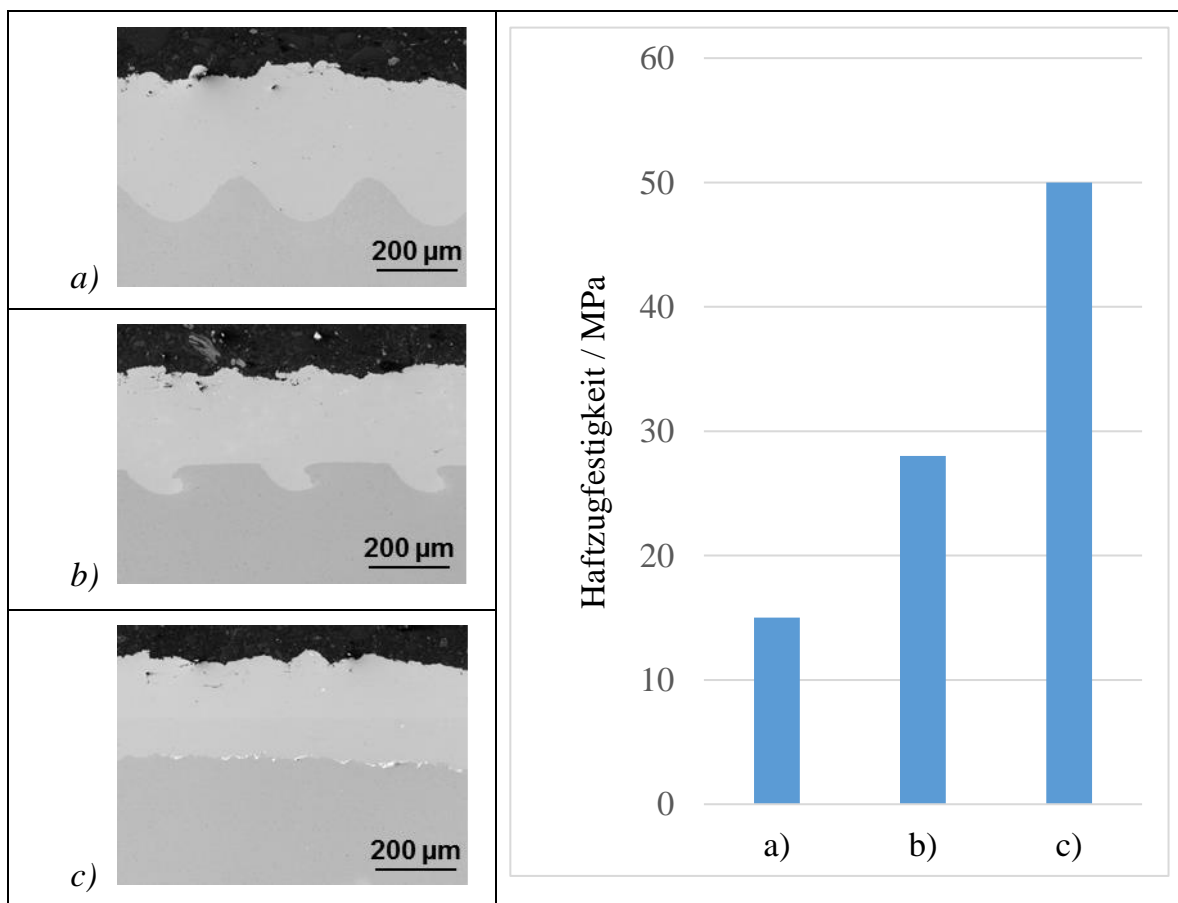
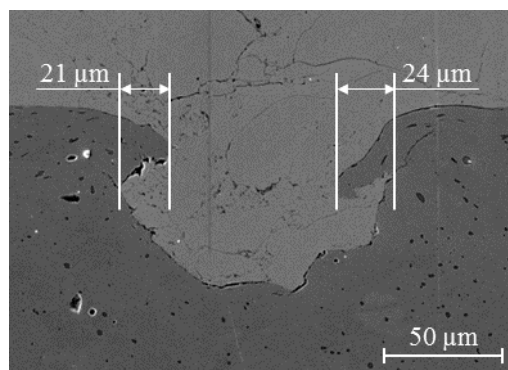


Abb. 5: Querschliffe und Haftzugfestigkeitswerte der NiCr 80/20 Beschichtung: a) gerändelt, b) gerändelt und einstufig gewalzt, c) gestrahlt

In jedem der gezeigten Schliffbilder ist eine gute Anbindung der Schicht an das Substrat ersichtlich. Auch die resultierenden Hinterschneidungen bei der gerändelten und gewalzten Probe (Schliffbild b)) werden durch die thermische Spritzschicht gänzlich ausgefüllt. Des Weiteren sind in der *Abb. 5* die Ergebnisse der Haftzugfestigkeiten dargestellt. Die Haftzugfestigkeiten nehmen in der Reihenfolge „gerändelt“ ( $R_H = 15$  MPa), „gerändelt und festgewalzt“ ( $R_H = 28$  MPa) sowie „gestrahlt“ ( $R_H = 50$  MPa) zu.

### 3.2 Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe

Das Schliffbild in *Abb. 6* verdeutlicht die Ausbildung des Formschlusses durch die Verfahrenskombination Rändelfräsen und mehrstufiges Umwalzen. Bei Betrachtung der Substratoberfläche zeigt sich, dass durch inkrementelle Auslegung des Umwalzens der durch das Rändelfräsen erzeugten Zahnköpfe eine formschlüssige Anbindung der Beschichtung an das Substrat ermöglicht wurde. Die Aufteilung der Gesamtzustellung von  $a_{W, \text{Ges.}} = 0,80$  mm auf vier Inkremente  $a_{W, \text{Ink.}} = 0,20$  mm gleicher Größe bei gleichzeitigem Wechsel der Drehrichtung nach jedem Teilprozess gewährleistete dabei eine relativ symmetrische Ausbildung des Formschlusses. Insbesondere in der vergrößerten Darstellung kann erkannt werden, dass beide durch die sukzessive Umformung der Zahnköpfe generierten Hinterschneidungen annähernd gleicher Größe sind.



*Abb. 6: Querschliff einer NiCr 80/20 Beschichtung im Bereich der Hinterschneidungen des gerändelten und vierstufig umgewalzten Profils*

Die Abbildung zeigt, dass die Hinterschneidungen gänzlich mit Schichtwerkstoff aufgefüllt sind und keine Hohlräume bestehen. Hier kann von einer ausgeprägten formschlüssigen Anbindung der Beschichtung an das Substrat gesprochen werden. In *Abb. 7* sind die Schliffbilder der unterschiedlichen Schichtsysteme dieser Versuchsreihe mit den dazugehörigen Haftzugfestigkeitswerten dargestellt.



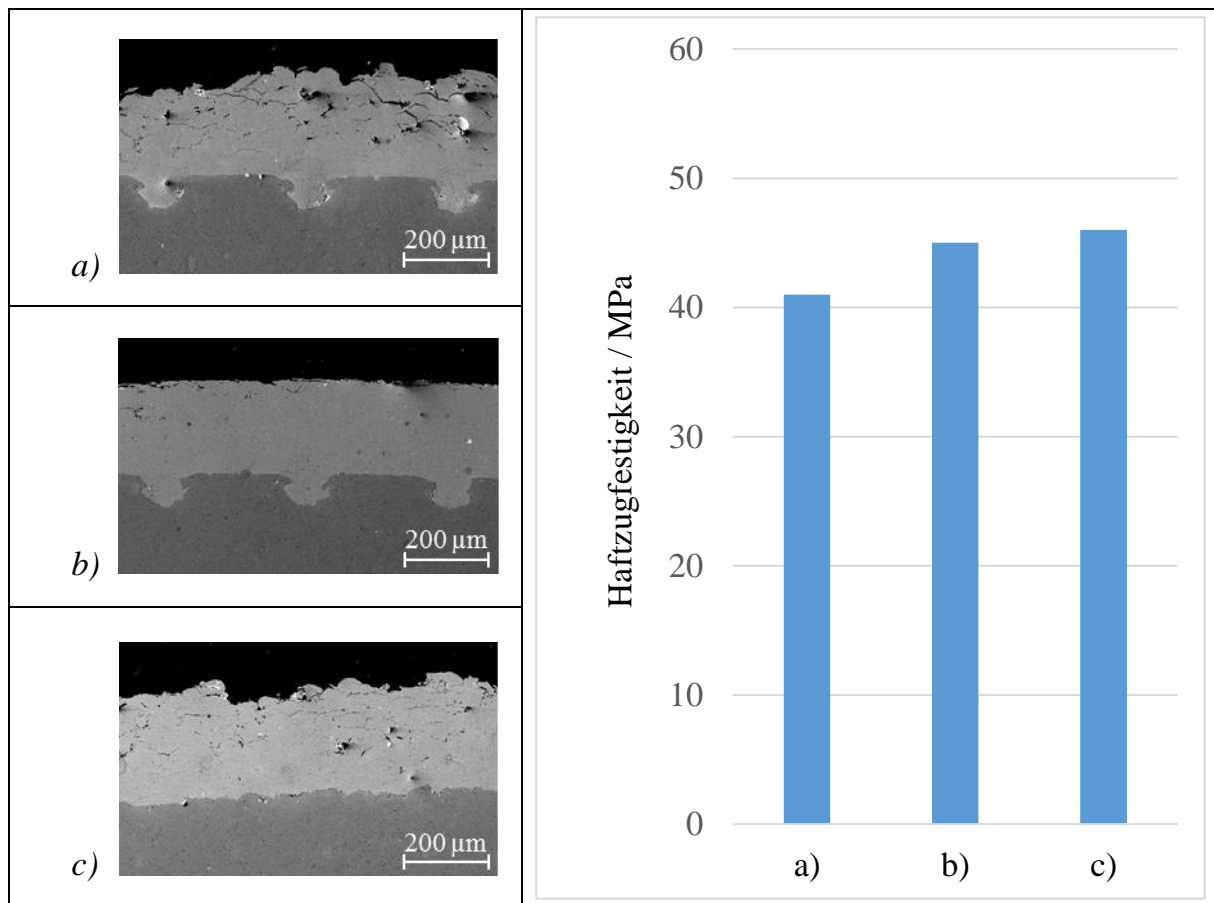


Abb. 7: Querschliffe und Haftzugfestigkeitswerte der NiCr 80/20 Beschichtung: a) gerändelt und gewalzt, b) gerändelt, gewalzt und festgewalzt, c) korundgestrahlt

Bei Betrachtung der Bilder lässt sich erkennen, dass durch den vierstufigen Umwalzprozess eine annähernd symmetrische Ausbildung der Hinterschneidungen erfolgte. Außerdem ist in der Aufnahme der in Abb. 7 b) gezeigten Proben festzustellen, dass durch das nachträgliche Festwalzen der Beschichtung eine ausgeprägte Glättung der Schichtoberfläche erfolgte. Zudem ist eine Verringerung der Porosität im oberen Bereich der Beschichtung erkennbar. Die Auswertung der Haftzugversuche zeigt, dass durch das Festwalzen der Beschichtung die Haftzugfestigkeit von  $R_H = 41$  MPa (Schliffbild Abb. 7a)) auf  $R_H = 45$  MPa (Schliffbild Abb. 7 b)) gesteigert wurde. Die Verfahrenskombination Rändelfräsen und Umwalzen mit einem nachgelagerten Festwalzen der Beschichtung eröffnet somit die Möglichkeit, Haftzugfestigkeiten in der Größenordnung von konventionell gestrahlten Substraten ( $R_H = 46$  MPa, Schliffbild Abb. 7 c)) zu erzielen.

#### **4. Zusammenfassung und Ausblick**

Die erzielten Ergebnisse verdeutlichen, dass die Erzeugung von geometrisch bestimmten Oberflächenstrukturen durch die Verfahrenskombination Rändelfräsen und Umwalzen für die formschlüssige Substratanbindung thermisch gespritzter Schichten geeignet ist. Die Auswertung der ersten Versuchsreihe zeigt zwar, dass die Haftzugfestigkeiten die durch den reinen Rändelprozess erreichbar sind, geringer sind als die der konventionell angebundenen Beschichtungen. Wird das gerändelte, periodische Profil jedoch umgewalzt, so wird die Haftzugfestigkeit nahezu verdoppelt. Der Grund für die gesteigerte Schichthaftung liegt in der Ausbildung von Hinterschneidungen, die eine formschlüssige Anbindung der Beschichtung an das Substrat ermöglichen. Ferner zeigt der Vergleich der beiden Versuchsreihen, dass ein mehrstufiges Umwalzen des gerändelten Profils die Haftzugfestigkeiten steigert, was auf die Erhöhung der Hinterschneidungen zurückzuführen ist. Das zusätzliche Festwalzen der Beschichtung an mehrstufig gewalzten Profilen bewirkt, dass Haftzugfestigkeiten in der Größenordnung von konventionell gestrahlter Substrate erzielt werden können. Bei Gegenüberstellung der Schliffbilder der Versuchsreihen wird darüber hinaus deutlich, dass die Oberfläche der Beschichtung durch den nachgelagerten Festwalzprozess zum einen geglättet, und dass die Schichtporosität zum anderen erheblich reduziert wurde. Dies würde sich positiv auf den Nachbearbeitungsaufwand der Spritzschichten auswirken.

Des Weiteren ist anzunehmen, dass eine Reduzierung der Rändelteilung nochmals positive Auswirkungen auf die Schichthaftung hat, da der Abstand zwischen den Hinterschneidungen reduziert und die Anzahl der Formschlüsse entsprechend erhöht wird.

#### **Danksagung**

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung dieses Projektes (GZ: BI 498 90).

## Literatur

- [1] Babiak, Z.; Wenz, T.: Grundlagen der thermischen Spritztechnik, Flamm- und Licht-bogenspritzen in: Bach, Fr.-W.; Möhwald, K.; Laarmann, A.; Wenz, T. (Hrsg.) Moderne Beschichtungsverfahren, Wiley-VCH, Weinheim, 2005
- [2] Norm DIN EN 13507: Thermisches Spritzen - Vorbehandlung von Oberflächen metallischer Werkstücke und Bauteile für das thermische Spritzen, Beuth, Berlin, 2010
- [3] Adams, K. H.: Oberflächenvorbehandlung – Lackieren, Kleben, Emaillieren; WILEY-VCH Verlag GmbH; Weinheim; 1999; S. 36
- [4] Pietschmann, J.: Industrielle Pulverbeschichtung – Grundlagen, Anwendung, Verfahren; 3., überarbeitete Auflage; Vieweg + Teubner, GWV Fachverlage GmbH; Wiesbaden; 2010; S. 220
- [5] Müller, K.-P.: Praktische Oberflächentechnik – Vorbehandeln, Beschichten, Prüfen; 3., überarbeitete Auflage; Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH; Braunschweig/Wiesbaden; 1999; S. 17-21
- [6] Betrieblicher Umweltschutz in Baden-Württemberg: Informationsblatt Strahlarbeiten; URL: <http://www.bubw.de/?lvl=2357>; Stand: 01.09.2016
- [7] Hoffmeister, H.-W.; Schnell, C.: Zylinderlaufflächen einfach und schnell aufrauen, Maschinenmarkt, 37(2010), S. 86 – 88